

# 基于 PHM 技术在民航发动机维修应用的启示

王 蒙 彭珊珊

浙江长龙航空有限公司 浙江杭州 311200

**摘 要:** 20 世纪 70 年以来,故障预测与健康管理的 (PHM) 技术应用于民用航空器维修,在欧美发达国家得到了长足发展,我国则严重滞后。从安全性、经济性、保障性视域概述和分析了我国民航发动机维修现状及存在的短板。PHM 技术作为实现民航发动机视情维修 (OCM) 的重要手段,从发达国家 PHM 技术研发应用中得到启示,提出要注重跨学科多部门协同融合、强化智能材料、传感装备等关键领域的创新和在推动我国 PHM 技术体系构建发展中应当重点关注的问题。

**关键词:** 民航发动机; 视情维修; 故障预测与健康管理的

## Enlightenment Based on PHM Technology in Civil Aviation Engine Maintenance Application

Meng Wang Shanshan Peng

Zhejiang Loong Airlines CO.,LTD. Zhejiang Hangzhou 311200

**Abstract:** Since the 1970s of the 20th century, the application of fault prediction and health management (PHM) technology in civil aircraft maintenance has made great progress in Europe and the United States developed countries, but our country is seriously lagging behind. From the perspective of safety, economy and protection, this paper summarizes and analyses the maintenance status and the shortcomings of Chinese civil aviation engine. Abstract: PHM technology is an important means to achieve on-condition maintenance (OCM) of civil aviation engines. Inspired from the research and application of PHM technology in developed countries, it is proposed that we should pay more attention to the innovation in the key fields such as interdisciplinary and multi-department collaborative integration, strengthening smart materials and sensor equipment, and focus on the problems in promoting the construction and development of PHM technology system in our country.

**Keywords:** Civil aviation engine ; On condition maintenance ; Prognostics and health management

### 引言

航空发动机属于构造复杂精密的热力机械,是飞机的核心部件。由于发动机运行工况复杂多变,在运行过程中产生高温、高压、强振动等,出现部件功能状态异常或机械故障在所难免。故障产生原因的不确定性,给监测、预测带来难度,更使维修决策复杂化<sup>[1]</sup>。对发动机检测、养护、维修是飞机维修的重点,故障预测与健康管理的 (Prognostics and Health Management, PHM) 技术在航空发动机健康管理 (Aircraft Engine Health Management, EHM) 中的应用,是航空器视情维修 (On Condition Maintenance, OCM) 的一场技术革命。民用飞机事故约三分之一源于发动机故障<sup>[2]</sup>,其维修成本约占整机维修费用的 30%。PHM 技术以平衡经济性、安全性、保障性为目标<sup>[3]</sup>,能够有效提高飞机发动机系统可靠性并降低维护费用,成为了 OCM 的重要实现途径,其发展与应用倍受关注。回顾民航发动机维修发展历程和 PHM 技术在 EHM 中的应用,梳理所获启示,以期为

民航发动机维修创新发展提供参考。

### 一、航空发动机维修概述

从 20 世纪 50 年代初期涡轮螺旋桨飞机、1958 年越洋喷气式飞机、1970 年之后的宽体和高涵道比发动机飞机相继问世,航空产业得到了长足发展,航空发动机维修市场方兴未艾。随着航空装备不断升级换代,航空发动机性能逐步增强、结构趋于复杂,对维修精度、实效性和安全性提出了更高要求<sup>[4]</sup>,航空发动机维修方式也从早期的发生故障后恢复性维修,逐步升级为预防性维修、视情维修以及基于视情维修的故障预测与健康管理的,维修方式在探索中不断得到发展。

#### 1. 航空发动机恢复性维修和预防性维修

早期航空发动机的维修是在出现了故障之后才对其进行以功能性恢复为目的的维修。恢复性维修 (Corrective Maintenance, CM) 包括故障定位、故障隔离、分解/更换、再装、校验以及修复损坏部件等<sup>[5]</sup>。然而,恢复性维修并不能消除事前故障隐患,飞机安全性堪忧。于是

预防性维修(Preventive Maintenance, PM)理念应运而生,其核心是在故障尚未出现或机械尚未受损状态下就对发动机系统进行检测或对部件进行更换,即采取预防性措施控制机械失灵或防止机械功能早期衰退。预防性维修可分为三种情形:一是定期维修。前提是要充分掌握拟维修机械系统或部件的使用寿命和运行规律,在此基础上预先制订维修计划,定期/定时按部就班遵照计划实施维修,以保障发动机系统处于良好的运行状态。但是,定期维修容易造成维修过剩或漏修、失修。二是状态维修。利用传感技术对飞机部件/系统及其运行状态进行适时检测、诊断、分析和评估,在此基础上提出预防性维修方案并实施维修。优点是检测目标明确、维修计划针对性强,维修过程有的放矢,维修效率高。难点是故障识别需要高精度检测仪器设备,特别是数据采集需要预先将监测装置嵌入被检测系统,具体操作涉及传感器预置、数据传输、识别、转换和分析等复杂过程,操作难度大。此外,数据采集过程受机械运行的环境因素干扰,会影响检测精度,容易出现误判,甚至出现虚假报警。三是主动维修。是在发现某个部件(局部)发生故障后,及时进行检测、分析原因、评估风险、提出方案、主动维修,预防产生系统性故障。优点是发现问题后及时主动采取有效措施,防患于未然。但在操作过程中会遇到很多不确定因素,例如需要及时发现问题、在第一时间判断故障原因,这在很大程度上是依赖于维修人员的经验。事实上,在测定状态和征兆之间会产生多重相关的复杂情形,同一征兆可以对应多种不同的技术状态;有些故障在飞行中偶然出现,但在地面检查中却无法找到。这些复杂的情形无疑给维修决策增加了难度<sup>[1]</sup>。另外,维修工作涉及面窄,维修只针对故障发生点上的局部控制,而对于面上的系统性故障防御则缺乏深度干预。

## 2. 航空发动机视情维修

航空发动机视情维修(OCM),是指对发动机机械系统按照预设技术标准,在使用寿命内应用现代检测技术手段,发现潜在故障隐患并提供消除故障方案的一种维修活动。OCM强调在正确的时间对机械系统进行正确的维修,以实现减少停机、降低成本、控制故障、确保安全的目标。OCM实现途径至少包含以下4项关键流程(或支撑条件):1)在线/离线数据采集(由先进的传感技术支撑);2)数据处理(现代数据处理技术、信息融合技术支撑);3)决策信息生成(设备健康状态、故障预测信息支持);4)视情维修决策(资源配置、设备使用管理服务体系支持)。通过OCM可有效解决维修不足和维修过剩问题。

## 3. 航空发动机故障预测与健康管理的(PHM)

航空发动机PHM技术是利用机内测试数据对设备的未来健康状态进行预测,并制定针对性维修计划的维护维修技术体系<sup>[6]</sup>。PHM借助现代传感技术对装备系统状态进行实时监测、应用人工智能技术实现对系统健康

状况评估、预测和管理,是实现视情维修的重要手段。PHM系统涵盖了状态监测、故障诊断、故障预测、健康管理等关键技术要素<sup>[7]</sup>,通过传感器采集数据,应用智能算法(数据融合、物理模型、神经网络、模糊逻辑、专家系统等)进行数据分析,从而实现对系统对象的故障预测和全寿命周期的健康管理<sup>[8-9]</sup>。PHM系统源于状态监控,由早期的重点参数监测和回放功能逐渐转变为现时的状态监测、故障诊断、趋势分析、寿命管理与维修决策支持等功能<sup>[10]</sup>。PHM技术起始于20世纪70年代,90年代随着美国航空航天事业发展<sup>[11]</sup>,在航空发动机上得到应用,对于降低发动机突发性故障机率、避免过度维修或失修、减少对机械运行系统的干扰和降低维修成本具有重要意义,是实现航空发动机视情维修的最直接有效的途径。

## 二、我国航空发动机维修存在的短板

### 1. 维修理念、维修方式和维修技术滞后

目前,我国航空发动机维修仍然沿用事前保养、事中抢修和事后维修为主的定期维修模式<sup>[12-13]</sup>,对发动机状况评估是在基于机上超限告警监视、机下离线飞行参数判读、油样分析和无损检测<sup>[14]</sup>基础上做出的。由此所获得的信息并不能充分满足故障诊断需求条件,很难对故障原因做出及时准确判断,更难实现对发动机故障预测和对关键部件剩余寿命的预测。定期维修消耗了大量人力、物力,但仍然难以达到行业对航空发动机可靠性和安全性预期评估效果。事实上,现代装备的运行寿命与其发生故障的可能性之间的相关性越来越小<sup>[15]</sup>,传统的航空发动机定期维修模式,已不能充分满足对其实施故障精准预测、维修和健康管理的要求。

### 2. 航空发动机机载监测系统不完备

对发动机评估和预测需要实现多种数据与监控经验的有机融合,从而使各路信息能够互补<sup>[6]</sup>。长期以来,我国民航发动机主要从国外引进,由于原始设备制造商(Original Equipment Manufacturer OEM)对发动机设计知识产权保护,用户很难充分掌握发动机关键技术参数,特别是老旧机型机载监测系统配置不完备,因而要实现PHM技术与维修保障的有效融合,还存在着较大差距<sup>[15]</sup>。目前,由于对航空发动机在线监测的条件不充分,数据收集不完整,大量监测工作不得不在地面进行。由于缺乏充分的试验数据和理论依据<sup>[6]</sup>,给研判发动机部件性能、衰退程度、故障趋势及修复效果等增加了难度。

### 3. PHM系统技术标准成果匮乏

航空发动机PHM系统技术标准是支撑和提升航空器设备健康管理效率、经济效益和降低运行风险的关键。目前,我国民航领域针对状态监测,只形成了少量、局部和零散的用于机载PHM健康管理的行业标准,PHM系统技术标准成果严重匮乏。PHM标准编制和应用总体上还处于起步跟踪阶段<sup>[16]</sup>。欧美发达国家不但注重PHM技术标准的研制,并且已形成了较为完备的技术体

系。例如: SAE E-32 系列燃气涡轮发动机监视系统标准、ARP6835 基于持续适航的飞机发动机监测系统标准、AIR5871A 发动机故障预测标准、ARP5120 航空燃气涡轮发动机健康管理软件开发与集成指南、AIR7999 发动机监控管理系统的故障诊断与预测指标体系、ARP1839 航空涡轮发动机振动监测系统 (EVM) 指南等。

#### 4. 关键技术、关键材料及零部件对外依存度高

实现 PHM 的关键是从监测对象系统中获得适时准确的有效数据。航空发动机传感器数据如果不准确, 就会产生错误结果, 导致间接的、时间滞后的损失, 危及飞机安全<sup>[17]</sup>。显然, 由高密度、低强度材料制造的传统传感设备已不能满足现代装备实现视情维修的需求<sup>[7]</sup>。传感装备的改进依赖于智能材料 (Intelligent material) 的技术进步, 目前我国使用的高端灵敏传感器 80% 依赖进口, 数字信号处理和识别系统对外依存度高, 数字化、智能化、微型化产品严重短缺。

### 三、PHM 技术应用对我国航空发动机维修的启示

#### 1. 跨学科多部门协同融合, 推动 PHM 技术研发与应用

航空业发达国家在推进 PHM 技术发展中, 特别注重跨学科多部门协同融合, 发挥系统集成优势和协同创新, 并将研发成果快速转化, 促进 PHM 技术的推广应用。例如, 美国军方为了改进和拓展 PHM 系统的能力, 大力推动人工智能、大数据分析、云计算、物联网等高新技术在航空领域 PHM 技术中的应用。美国国防部与工业界合作, 将人工智能、自动化和机器学习技术应用到航空领域<sup>[18]</sup>。在民用航空发动机维修方面, 航空公司与飞机原始设备制造商、发动机制造商、传感器供应商和软件公司, 以互联方式开展合作, 创建了基于云计算的飞机健康监测系统等。

#### 2. 强化关键重点领域的创新发展

PHM 技术关键在于基础数据采集和健康特征参数提取与分析。传感器是获取基础数据的重要手段, 也是构建航空发动机 PHM 体系不可或缺的主要技术支撑要素。智能化、微型化、集成化和超低功耗已成为传感器技术的发展趋势。智能材料集传感、驱动及微电子处理为一体, 将其嵌入监测对象 (航空发动机) 系统, 不仅可以感知、收集、反馈系统界面和内部信息, 还可以整合感知信息资源, 进行自身结构调整修复, 并以此为基础, 实现对材料结构器件的寿命周期、失效过程进行准确评估预测<sup>[1]</sup>。目前, 我国在智能材料和新型智能传感器研制等关乎 PHM 技术发展的关键技术领域, 亟待创新突破。

#### 3. 增加投入促进航空发动机维修产业健康发展

基于航空发动机构造的复杂性以及对其安全性的高标准要求, 构建航空发动机 PHM 系统需要较高的投入<sup>[19]</sup>。目前, 受监测成本和技术条件限制, 监测样本量明显不足、预测时间范围偏短, 一定程度上影响了监测效果和预测的准确性<sup>[20]</sup>。为实现航空发动机性能精准预测, 需

要将发动机受损情形、寿命信息、维修历史以及传感数据等基础信息深度融合<sup>[6]</sup>, 在此基础上, 深入推动民航发动机维修产业向信息化、智能化、数字化方向发展。

### 结束语

在利用 PHM 技术提高航空发动机可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性及降低维修费用等方面, 欧美发达国家的经验值得借鉴。目前, 我国还没有形成成熟的故障预测与健康管理体系。PHM 技术作为民航发动机实现视情维修的重要途径, 需要进一步深入发掘系统的健康演化规律, 提升监测技术水平、预测准确率、系统控制力和健康自愈力。通过对监控对象与 PHM 系统的协同设计<sup>[21]</sup>与深度融合, 在定量分析与综合评价的基础上, 优化航空发动机的维修策略。

### 参考文献:

- [1] 张海军. 民航发动机性能评估方法与视情维修决策模型研究 [D]. 江苏南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [2] 刘元芳. 航空发动机气路故障的智能诊断方法研究 [D]. 福建 厦门: 厦门大学, 2018.
- [3] 邱立军, 吴明辉. PHM 技术框架及其关键技术综述 [J]. 国外电子测量技术, 2018, 37 (2): 1-15.
- [4] 夏为浩, 张金奎. 航空装备视情维修应用研究 [J]. 航空维修与工程, 2020 (4): 33-36.
- [5] 梁剑. 基于成本优化的民用航空发动机视情维修决策研究 [D]. 江苏 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [6] 谭治学. 多源信息融合的民航发动机性能预测方法研究 [D]. 黑龙江 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [7] 丁秋月, 和尧, 董超. 故障预测与健康管理体系结构综述 [J]. 航空维修与工程, 2021 (1): 70-74.
- [8] 宋太亮. 装备综合保障实施指南 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [9] 曲昌琦, 周锐, 杜宝, 等. 航空装备故障预测与健康管理的数据库体系研究 [J]. 航空科学技术, 2020, 31 (12): 61-67.
- [10] 李军, 杨旭. 航空发动机健康管理系统的功能架构 [J]. 航空动力, 2019 (1): 71-74.
- [11] 焦瑞华. 面向复杂工程系统的故障预测方法研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [12] 李向前. 复杂装备故障预测与健康管理体系关键技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [13] 张振宇. 航空发动机维修质量管理 [J]. 装备维修技术, 2020 (20): 141.
- [14] 徐弋迪, 徐晨. 航空发动机健康管理系统的研究综述 [J]. 福建质量管理, 2019 (14): 270, 96.
- [15] 马飒飒, 赵守伟, 陈国顺, 等. 复杂装备故障预测与健康管理体系及应用 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2012.
- [16] 魏元雷. 民用飞机健康管理标准规范体系分析 [J]. 民用飞机设计与研究, 2021 (3): 101-109.

[17] 唐雅娟. 发动机试验传感器数据证实的软计算方法与系统实现研究 [D]. 北京: 国防科学技术大学, 2007.

[18] 张宝珍, 王萍. 飞机 PHM 技术发展近况及在 F-35 应用中遇到的问题及挑战 [J]. 航空科学技术, 2020 (7): 18-26.

[19] 费成巍, 艾延廷. 航空发动机健康管理系统设计技术 [J]. 航空发动机, 2009, 35 (35): 23-29.

[20] 付强, 王华伟, 熊明兰. 基于 GANBP 的航空发动机性能退化预测模型 [J]. 人类工效学, 2020, 26 (1): 1-6, 21.

[21] 吕琛, 马剑, 王自力. PHM 技术国内外发展情况综述 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 1-4.

作者简介

王蒙, 男, 工程师, 从事飞机维修计划工作。